DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.023

镁合金手机外壳制备相关性能研究进展

张瑞琦[1,2],蒙　毅[1],张斯杰[1],崔书铭[1]

(1. 北方工业大学 机械与材料工程学院，北京 100144；2. 中国科学院过程工程研究所 离子液体清洁过程北京市重点实验室,北京 100190)

摘　要:镁合金手机外壳因其独特的优点,得到越来越多手机厂商的青睐。镁合金手机壳在制备过程中,应重点考虑其加工成形工艺、表面耐腐蚀性能、耐磨性和表面质量。根据镁合金手机外壳制备过程中的特殊工艺要求,结合近些年国内外对此问题的研究现状及进展分析,综述了镁合金手机壳加工成形工艺及改善手段,以及其耐腐蚀性能、耐磨性和表面着色能力的提升方法。

关键词:镁合金;手机壳;加工成形;性能;表面着色

中图分类号: TG146.22　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)08-0852-06

Research Progress in Preparation Related Performances of Magnesium Alloy Cell Phone Shell

ZHANG Ruiqi[1,2], MENG Yi[1], ZHANG Sijie[1], CUI Shuming[1]

(1. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Beijing Key Laboratory of Ionic Liquids Clean Process, Institute of Process, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Magnesium alloy mobile phone shell also because of its unique advantages, more and more mobile phone manufacturers favor. In the preparation of magnesium alloy case, the processing and forming process, corrosion resistance, wear resistance and surface quality should be taken into account. According to the special technological requirements in the preparation of magnesium alloy mobile phone shell, the processing and forming technology of magnesium alloy mobile phone shell and the improvement methods, as well as the improvement methods of corrosion resistance, wear resistance and surface coloring ability are summarized.

Key words: magnesium alloy; mobile phone shell; forming process; properties; surface coloring technique

手机已成为人们日常生活中不可缺少的一部分,手机革命牵动着各行各业的发展,具有质量轻、强度高、导热、电磁屏蔽性能优良、尺寸稳定、外观好、易于回收等特点的手机外壳,也成为手机研发过程中的一个重要环节。目前,手机外壳常用的材料主要为工程塑料和金属材料两大类[1]。工程塑料的导热性、耐磨性和强度较差,且不能通过回收再利用,对环境产生污染。近几年来随着技术的提升,用金属材料，尤其是镁合金制作的手机外壳得到了越来越多手机生产厂家的青睐[2]。

镁合金被称为“21 世纪的绿色工程材料”,在交通、航空、航天和电子产品等领域非常具有吸引力[3]。镁合金应用于手机外壳,主要是因为:①镁合金具有良好的电磁屏蔽性能，可防止手机内部设备受到外界电场影响。②镁合金具有良好的热传导性,便于手机内部零件的热量传输。③镁合金密度小，比强度高,满足手机外壳所需的力学性能要求。④镁合金具有良好的尺寸稳定性,除部分镁合金外,大多数镁合金在长时间使用过程中因相变而引起的尺寸变化几乎为零[4]。⑤易于回收,镁合金产品回收利用的能耗少,可带来显著的经济效益,同时减少对环境的污染[5]。但镁合金应用于手机外壳的过程中,会出现耐腐蚀、耐摩擦性能较低的情况。因此,探索镁合金手机外壳的制备工艺，为镁合金手机外壳的制备提供相关理论基础是目前需解决的问题。

收稿日期:2019-02-22

基金项目:北京市自然科学基金项目(2164060);北京市大学生科学研究与创业行动计划(108051360018XN130);北京市教育委员会科技计划一般项目(KM201910009007);北方工业大学“毓青人才培养计划”(107051360018XN012)

作者简介:张瑞琦(1995-),女,山东德州人,博士研究生.研究方向:镁合金铸造工艺研究、PET 降解.
E-mail: 1248450759@qq.com.

通讯作者:蒙　毅(1985-),陕西咸阳,博士,讲师.研究方向:轻合金合金化理论与成形工艺研究.
电话:010-88802105,E-mail: mengyi@ncut.edu.cn

1　镁合金手机外壳的加工成形

手机外壳作为薄壁类零件，其壁厚小、结构复杂、尺寸精度和表面质量要求高[6]。不同的加工成形工艺制备出的镁合金的性能有很大差别，因此选择适合的加工工艺具有重要意义。

1.1　压铸

压铸技术因其具有充型速度快、凝固速度快、可实现薄壁制件的加工等方面的优势[7]，是镁合金最主要的成形工艺，世界上绝大部分的镁合金铸件是由压铸工艺生成的，并且由于镁合金优良的填充性能（充型能力和流动性），压铸件的厚度可降低到少于 1 mm，适用于手机壳的应用需求[8,9]。

在采用压铸工艺生产手机壳时，要保证铸件填充的完整性和铸件的优良性能，且要求铸件的表面质量优异。通过对手机外壳铸件的模拟分析，发现利用适当提高压射速度（加快加压时间和比压）、浇铸温度和模具温度的方法，可避免流痕的产生，细化晶粒，减少缩孔数量，改善铸件表面质量和提高铸件的力学性能[9]。如在一定范围内，适当提高压射速度可提高 AZ91D 镁合金薄壁件的表面质量和力学性能[6]，如图 1 所示。

目前，随着技术的发展，镁合金在传统压铸的基础上又发展出了充氧压铸、真空压铸等新型压铸技术[10]。充氧压铸是在金属液充填压铸型腔前，向型腔中充入氧气，使氧气与金属液反应生成氧化物颗粒，从而消除压铸件的气孔，还可使铸件具有良好的拉伸强度和疲劳性能，适用于在较高温度下使用或需要焊接组合的压铸件[11]。真空压铸是通过将型腔内气体抽出的方法来减少铸件内的气孔，增强镁合金压铸件的力学性能，并提高表面质量[12]。对真空压铸镁合金，其力学性能可随真空度的提升而提高[13]。充氧压铸和真空压铸可提高镁合金的力学性能和表面质量，但其加工成本会高于传统压铸。因此，生产镁合金手机外壳时，选用何种压铸工艺，应对产品质量和加工成本进行综合考虑，以选择出最优的成形技术。

1.2　半固态成形

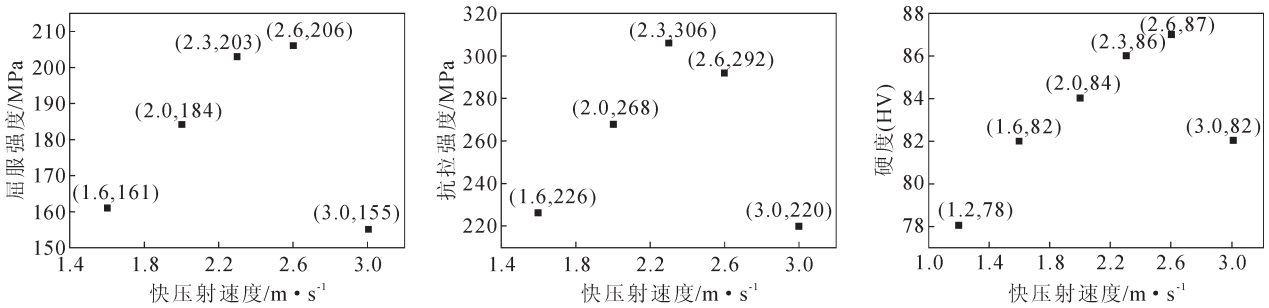
半固态成形是利用半固态金属进行加工成形的一种工艺，其成形温度低，并可降低产品中的缺陷数量。半固态成形技术分为触变成形和流变成形两类。目前，市场上唯一用于镁合金薄壁件生产的半固态成形技术为触变成形技术。其是将固态、半固态坯料经过两次加热至两相区，同时施加一定压力实现凝固成形的方法[14]。虽然有研究者利用高压压铸和流变成形技术成功获得气孔少、无枝晶的薄壁 AZ91D 镁合金薄壁件[15]，但与传统成形技术相比，工艺设备的技术要求更高，生产前期投入更大。

此外，触变注射成形技术也是半固态成形技术的一种，利用高速、高压的方法将原料注入金属模具内进行成形的技术，该技术不需要金属熔化、浇注等工序，与传统压铸相比，生产的镁合金产品表面孔洞数量减少[16]、表面质量得到改善[12, 17]。同种镁合金的触变注射成形件与压铸成形件相比，尺寸精度高，表面呈金属光泽，表面粗糙度小，可用于制造手机、笔记本电脑等电子产品的外壳[17, 18]。

1.3　塑性成形

镁的晶型为密排六方晶格，不宜进行塑性成形，但塑性加工可细化镁合金的晶粒，提高镁合金的力学性能，因此选择合适的塑性成形工艺对制造性能优异的镁合金薄板具有重要意义[19]。

轧制是生产镁合金薄板的主要生产方式，对传统镁合金轧制工艺，选择合理的轧制温度和在道次轧制间的反复退火热处理，是控制镁合金板材性能的主要工艺因素[20]。在线电阻加热连续轧制工艺是镁合金板材成形的一种新型轧制工艺，该工艺实现在较低轧制温度下 AZ31B 镁合金的连续轧制，可将 4 mm 板材连续轧制成 0.8 mm 的镁合金薄板，且所得 AZ31B 镁合金薄板的表面质量优良，与传统轧制工艺相比具有更高的塑性和强度，适用于手机外壳



(a)屈服强度　　(b)抗拉强度　　(c)硬度

图 1　快压射速度对 AZ91D 镁合金薄壁件力学性能的影响

Fig.1　Mechanical properties of AZ91D magnesium alloy thin-wall parts at different fast injection speeds

的生产[21]。辽宁科技大学镁合金铸轧研究中心，成功研制出一种可获得 0.3 mm 厚 AZ31 镁合金薄板的六辊温轧机，为制备超薄镁合金手机外壳提供了技术支持[22]。

镁合金手机外壳对尺寸精度和表面质量的要求较高，且其厚度在 1 mm 以下。上述几种加工成形工艺均有各自的优缺点，但综合考虑，半固态成形技术作为较新型的镁合金成形技术，其生产加工的手机外壳表面质量更高，综合性能更加优异。

2 镁合金手机壳的性能提升

镁合金手机外壳除应具有良好的电磁屏蔽性、热传导性和件重轻等优势外，在使用过程中，还应具有较好的耐磨性、耐腐蚀性和漂亮的外观，以抵御在使用过程中人体汗液的腐蚀和磨损。镁的稳定性较差，自然形成的氧化层为疏松多孔的结构，对镁基底不能起保护作用，在自然环境中极易受到腐蚀[23]。镁合金的耐磨性较差，在发生相对滑动的过程中，容易产生塑性变形，表面失去光泽[24]。因此，需提高镁合金手机壳的耐磨蚀性能，保证其在使用过程中能保持良好的表面光泽。

2.1 镁合金手机壳的耐腐蚀性能

提高镁合金手机外壳耐腐蚀性能的方法有很多。主要分为两大部分：①通过各种途径提高镁合金自身的耐腐蚀性能；②对镁合金进行表面处理，使镁合金表面生成致密保护膜或涂层，提高其耐腐蚀性能[25]。

2.1.1 控制合金元素的含量

在镁合金中，Fe、Ni、Cu 等杂质元素对镁合金耐腐蚀性影响显著，降低这些杂质元素在镁合金中的含量可有效提高镁合金的耐腐蚀性能。在控制这些杂质元素的同时，向镁合金中添加 Mn、Al、Zn 和稀土元素，可提高镁合金的耐腐蚀性能[24]。其中，稀土元素可有效细化 β 相晶粒，降低与 α-Mg 的电位差，使合金表面形成致密的氧化膜[26]。通过对 AZ91D、ZM5 和 AR091（含稀土的 Mg-9Al）镁合金的腐蚀行为的研究，发现 AR091 的腐蚀速率最低，仅为 AZ91D 镁合金腐蚀速率的 1/3，表明稀土元素的加入，对提高镁合金的耐蚀性具有显著作用[27]。在 Mg-6Al-1Zn 镁合金中添加微量钇，可使组织发生明显细化，提高其耐蚀性[28]。

2.1.2 采用适当的热处理工艺

通过热处理工艺，可以改变镁合金的组织，进而提高其耐腐蚀性。固溶时效工艺常用于镁合金的热处理，固溶处理可细化镁合金相，从而增强其耐蚀性[25]。经过 420 ℃×24 h+ 水淬固溶处理工艺处理后的 AM50 镁合金，在短时间内耐蚀性强于未经过热处理的 AM50 镁合金[29]。此外，其他的热处理工艺也可提高镁合金的耐蚀性。如对 Mg-2Zn-0.4Ca-0.2Mn 合金，均匀化退火后第二相明显减少，组织成分更加均匀，减轻了微电池效应，与未经均匀化处理的镁合金相比，耐腐蚀性提高了 50.14%[30]。

2.1.3 表面处理

（1）制备超疏水表面　超疏水表面具有自清洁、防污、抗腐蚀、油水分离等独特的性能。因此，在镁合金表面制备超疏水层，可提高其表面的耐腐蚀能力。制备超疏水表面的主要工艺有：微弧氧化、刻蚀、电沉积、水热法和化学成膜等[31,32]。

利用水热法在 AZ31 镁合金表面制备的微纳米花状超疏水表面，可使镁合金在 3.5%NaCl 溶液中不被腐蚀[33]。利用微弧氧化加有机镀膜技术的方法，可在 Mg-Mn-Ce 合金表面制备静态接触角为 173.3° 的超疏水复合膜层，使得该合金在 3.5%NaCl 溶液中的电流密度降低，电化学阻抗提高，使镁合金的耐蚀性能得到明显提升[34]，如图 2 所示。

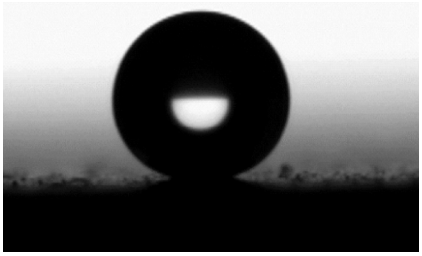
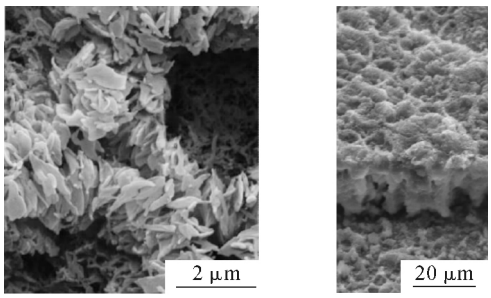


图 2 蒸馏水液滴在复合处理后镁合金表面的静态接触角
Fig.2 Distilled water droplets and contact angle on duplex-treated surface by polymer plating on micro-arc oxidation film

利用阳极氧化预处理加电沉积的方法，可在 AZ31 镁合金表面制备出超疏水复合涂层，在预处理层和涂层的共同作用下，在腐蚀液中长时间浸泡也可保持稳定的阻抗模值，具有很好的耐蚀性[35]，如图 3 所示。



(a)表面形貌　(b)截面形貌

图 3 复合涂层形貌
Fig.3 Morphology of composite coatings

通过各项实验表明，制备超疏水表面可有效提高镁合金的耐腐蚀性能，且在手机壳的制造过程中，利用超疏水表面的自清洁功能，可使手机壳在使用过程中避免因人体的长时间接触而产生的污渍。但制备镁合金基底超疏水表面选用的试剂多为含氟有机试剂，对环境和人体有害，因此开发绿色无污染的试剂是未来的发展方向之一。

（2）磷化+阴极电泳涂装　阴极电泳涂装是制备镁合金表面膜层的一种工艺，为增加涂层的附着力和耐蚀性，可在电泳之前对镁合金进行磷化处理[36]。磷化是指将金属经含有 Zn、Mn、Cr、Fe 等磷酸盐的溶液处理后，在金属表面生成不溶或难溶于水的磷酸盐，对金属起到一种良好的保护作用[37]。磷化膜是公认的涂层的良好基底。对 AZ91 镁合金进行磷化+阴极电泳涂装处理，可得到表面平整、无针孔、无颗粒、厚度适中的漆膜，该漆膜可有效提高镁合金的耐腐蚀性能[38]。对 AZ31B 镁合金进行磷化预处理与电泳涂装工艺生成的复合涂层具有优异的物理、力学性能，与镁合金基体相比，该涂层的腐蚀电位正向移动了约 0.45 V，提高了耐腐蚀性能[39]。与其它工艺相比，磷化+电泳涂装工艺环保、无毒，而且适用于自动化生产。

2.2　镁合金手机壳的耐磨损性能

镁合金手机壳在使用过程中会产生磨损。因此提高镁合金的耐摩擦磨损性能，才能更好地提高镁合金手机壳的使用体验。

2.2.1　优化成形工艺

改变传统的成形工艺，应用先进的成形工艺，可降低镁合金材料的摩擦系数和摩擦率，提高其耐磨性。例如，对 AZ91D 镁合金，采用触变成形加工工艺，将工艺参数设置为坯料保温温度 585 ℃、加热时间 60 min、模具预热温度 300 ℃，由此获得的镁合金，与传统铸造工艺相比，摩擦系数和摩擦率显著降低，提高了镁合金的耐磨性[40]。此外，搅拌摩擦加工后的镁合金，晶粒尺寸减小，硬度增大，也可提高镁合金的耐磨性[26]。

2.2.2　进行表面处理

（1）超声冲击　超声冲击是一种新型的表面强化技术，可使作用区的表层金属组织发生变化，使冲击部位的性能得到强化。对 AZ91D 金属表面进行超声冲击处理后，材料表面的晶粒得到细化，表面硬度提高，耐磨性能显著提高。磨损性能与超声冲击的冲击电流和冲击时间有关，在相同电流下，耐磨性随冲击时间的加长而逐步提高[41]。

（2）其他表面处理工艺　通过激光表面改性处理工艺可改善镁合金表面成分、细化晶粒、使其组成相分布更均匀，可提高镁合金的耐摩擦磨损和耐腐蚀能力[42]。利用搅拌摩擦加工技术处理镁合金，可使材料在加工过程中产生塑性变形和再结晶，在基体表面形成均匀细化的组织结构，可显著提高镁合金的表面硬度、耐磨性[43]。利用物理气相沉积法，在镁合金表面沉积硬质涂层，可提高材料表面硬度，增加其耐磨性[44]。可在镁合金表面生成涂层的其他表面处理工艺，由于生成涂层的硬度高，均可提高镁合金的耐磨性。

2.3　镁合金手机壳的表面着色

色彩作为与消费者进行沟通的首要角色，在手机外壳的设计制备中占有重要地位[45]。因此，研究镁合金的表面着色工艺，增加镁合金手机外壳的色彩种类，是现在镁合金手机外壳的研究方向之一。

镁合金常用的表面着色工艺有化学转化＋喷涂、电化学氧化、微弧氧化等。化学转化是通过化学或电化学反应，在基体表面生成一种保护膜。在 3~4 g/L CrO_3、1~3 g/L $Na_2Cr_2O_7$、0.5 g/L NaF、0.5 g/L 缓蚀剂，温度为常温，pH 值 1.5，氧化时间 5~10 min 的氧化条件下，可以获得金黄色导电钝化膜[46]。

电化学氧化也称阳极氧化，利用不同的电解液，在控制氧化电压、时间等条件下，可得到不同颜色的氧化膜，实现表面着色的目的，同时还可进一步提高其耐磨性和耐蚀性。还可运用小电流电镀铜，对 AZ31 镁合金阳极氧化膜层进行封孔，得到紫红色膜层[47]。

微弧氧化技术是在电化学氧化技术上发展过来的，金属材料与电解液之间相互作用，使表面生成陶瓷膜，在起到着色作用的同时也可提高镁合金的耐蚀性。镁合金微弧氧化着色膜的制备方法主要为：浸渍着色法、电解着色法和整体着色法[48]。其中整体着色法制备的微弧氧化膜层的差异主要是由主盐和着色剂的不同所导致，主盐相同时，着色剂不同，膜层的颜色不同；采用相同的着色剂，盐溶液不同，膜层颜色也不会相同[49]。在硅酸盐电解液中，加入 $KMnO_4$ 然后对 AZ91 镁合金进行微弧氧化着色可得到黄色膜层[50]。对 AK60 变形镁合金，在铝酸盐-磷酸盐组成的复合体系中添加 $CuSO_4$ 可制备出灰褐色陶瓷膜，添加 $KMnO_4$ 可制备出黄色陶瓷膜[48]。随着技术的发展，微弧氧化用电解液从原来单一电解液发展为多种电解液相混合的复合电解液，并逐渐取代单一电解液。且为满足更多颜色的需求，可在电解液中添加着色盐，如对 AZ91D 镁合金在由硅酸钠、铝酸钠、氢氧化钠和氟化钾组成的电解液中，添加钒酸

铵可制备棕黑色陶瓷膜，添加重铬酸钾可制备黄绿色陶瓷膜[51]。各元素在不同氧化状态呈现的颜色不同，研究其显色与微弧氧化的作用机理是未来的研究方向，对不同颜色的成因进行分析，可对生产不同颜色涂层进行控制。

3 总结

镁合金手机外壳为薄壁类零件，在制备过程中，根据其独特的性质选择合适的加工工艺。在生产过程中，应注重产品的性价比，选择性价比最优的加工成形工艺。目前，选择压铸的方式生产镁合金手机外壳的加工成本最低，但产品质量要稍差于新型加工工艺。为提高镁合金手机外壳的使用寿命和表面质量，需对镁合金进行适当的表面处理。通过表面处理，可使镁合金获得漂亮的外观，提高耐腐蚀和耐磨损能力。化学氧化、电化学氧化、电泳涂装和微弧氧化等工艺都可用于镁合金表面处理，在提高其耐腐蚀和耐磨损能力的同时，又能得到亮丽的外观的镁合金表面处理技术，是降低镁合金手机外壳制备成本的有效手段。在现有工艺的基础上，提升镁合金的性能，降低制备成本使镁合金手机外壳获得更广阔的应用空间。

参考文献：

[1] 王永飞，赵升吨，张晨阳. 手机外壳材料及其成形工艺的研究现状与发展[J]. 锻压装备与制造技术，2015，50 (4)：72-77.
[2] 何良菊，李培杰，王晓强. 塑料与镁合金移动电话外壳材料的生命周期评价[J]. 机械工程学报，2003 (8)：44-48.
[3] 石然然，李名尧，李晓霞，等. 镁合金成形性能和加工技术综述[J]. 铸造技术，2013，34 (7)：889-891.
[4] 卢永青. 浅谈镁合金的性能及应用[J].科技向导，2011 (18)：353.
[5] 李文珍，蒋忠城. 镁合金 3C 产品外壳回收处理工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金，2007 ，27(S1)：120-123.
[6] 祁明凡，康永林，朱国明，等. 镁合金薄壁件压铸成形的工艺及数值模拟[J]. 中国有色金属学报，2017，27 (3)：448-458.
[7] 张鹏，曾大本. 异军突起的镁合金压铸 [J]. 特种铸造及有色合金，2002，22(S1)：307-309.
[8] 陈亚军，黄天佑. 镁合金应用现状及铸造技术研究进展[J]. 铜业工程，2005 (1)：45-49.
[9] 焦瑞萍. 镁合金手机外壳压铸模 CAD 系统的研究与开发[D]. 太原：太原理工大学，2010.
[10] 唐丽云. 压铸镁合金零部件缺陷分析及工艺改进措施 [J]. 中国金属通报，2017 (07)：87-88.
[11] 周智勇. 镁合金压铸技术在电子产业中的应用 [J]. 消费导刊，2007 (11)：196.
[12] 高顺，马晓录. 镁合金成形技术发展现状研究 [J]. 河南科技，2015 (5)：45-48.
[13] 张钰笔，李德江，胡斌，等. 真空度对压铸 AZ91D 镁合金组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金，2016，36 (1)：52-55.
[14] 陈刚，郑顺奇，王岩，等. 镁合金半固态浆料制备与成形技术研究进展[J]. 兵器材料科学与工程，2018，41 (3)：116-120.
[15] Qi M F, Kang Y L, Yan Y, et al. Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of AZ91D Alloy Formed by Rheomolding and High-Pressure Die Casting [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (10): 3826-3834.
[16] 曾英，罗静. 镁合金触变成形在 3C 产品壳体上的应用[J]. 重庆工学院学报，2006，20 (11)：44-46.
[17] 胡红军，杨明波，彭东，等. 镁合金触变注射成形技术综述[J]. 铸造，2006，55(8)：763-766.
[18] 卢志文，沈祥智，张洪峰. 镁合金手机外壳的冲压工艺研究[J]. 材料导报，2006，20 (7)：147-149.
[19] 高建良，章桢彦，靳丽，等. 镁合金锻造研究综述[J]. 热加工工艺，2012，41 (15)：104-108.
[20] 金柯. AZ31 镁合金薄板成形性能研究[D]. 鞍山：辽宁科技大学，2015.
[21] 曾斌. 镁合金薄板在线加热轧制工艺与组织性能研究[D]. 重庆：重庆大学，2017.
[22] 张文宇，高青，刘安琪，等. 一种轧制镁合金薄板表面缺陷检测系统[J]. 辽宁科技大学学报，2017，40 (4)：305-310,320.
[23] Chen H, Alpas A T. Sliding wear map for the magnesium alloy Mg-9Al-0.9Zn (AZ91)[J]. Wear, 2000, 246 (1): 106-116.
[24] 霍东兴，梁精龙，李慧，等. 镁合金耐腐蚀性的研究进展[J]. 热加工工艺，2017，46 (14)：36-39.
[25] 胡斌. 热处理对真空压铸 AM50 镁合金组织和耐蚀性的影响[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2017.
[26] 俞良良. 搅拌摩擦加工细晶 AZ31 镁合金腐蚀疲劳机理研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2017.
[27] 周学华，卫中领，陈秋荣，等. 含稀土耐蚀 Mg-9Al 铸造镁合金腐蚀行为研究[J]. 腐蚀与防护，2006 (10)：487-491，498.
[28] Manivannan S, Kumaresh Babu S, Srinivasan P. Corrosion Behavior of Mg-6Al-1Zn-XRE Magnesium Alloy with Minor Addition of Yttrium [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (4): 1649-1655.
[29] Yang M, Jin H, Liu Y H, et al. Influence of solid-solution treatment on corrosion performance of cast AM50 magnesium alloy[C].// International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer. China: IEEE, 2011: 425-429.
[30] 周波，李峻峰，周世杰. 均匀退火对 Mg-2Zn-0. 4Ca-0. 2Mn 镁合金组织和耐腐蚀性的影响 [J]. 热加工工艺，2017，22 (46)：228-231，234.
[31] 李杰，郭浩正，石文天. 镁合金超疏水表面制备技术的研究进展[J]. 表面技术，2016，45 (12)：15-22.
[32] Wang J, Li D D, Liu Q, et al. Fabrication of Hydrophobic Surface with Hierarchical Structure on Mg Alloy and Its Corrosion Resistance[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55 (22): 6897-6906.
[33] She Z X, Li Q, Wang Z W, et al. Novel Method for controllable Fabrication of a Superhydrophobic Surface on AZ91D Magnesium Alloy [J]. ACS Applied Material &Interfaces, 2012, 4 (8): 4348-4356.
[34] 康志新，赖晓明，王芬，等. Mg-Mn-Ce 镁合金表面超疏水复合膜层的制备及耐腐蚀性能 [J]. 中国有色金属学报，2011，21(2)：283-289.
[35] 钟雨杏. AZ31 镁合金表面超疏水涂层的制备及腐蚀行为研究

[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
[36] 曹京宜. 涂装表面预处理技术与应用[M]. 北京：化学工业出版社，2004.
[37] 类衍明，吴为，王金伟. AZ31B 镁合金表面磷化 / 阴极电泳复合涂层耐蚀性能研究[J]. 中国涂料，2010，25 (10)：22-24, 38.
[38] 罗霁，邢永翔. AZ91 镁合金磷化及电泳涂装工艺的研究[J]. 内燃机与配件，2017 (22)：135-136.
[39] 徐林林， 刘堂胜. 超声冲击对 AZ91D 镁合金耐磨性的影响[J]. 科技资讯，2017，15 (3)：82-85.
[40] 任峻，陶钦贵，马颖. 触变成型工艺对 AZ91D 镁合金摩擦磨损行为的影响[J]. 热加工工艺，2016，45 (11)：37-42.
[41] 郭兴伍，郭嘉成，章志铖，等. 镁合金材料表面处理技术研究新动态[J]. 表面技术，2017，46 (3)：53-65.
[42] 陈娟，彭立明，韩靖宇，等. 基于摩擦加工技术的镁合金表面改性研究现状[J]. 表面技术，2017，46 (3)：9-19.
[43] 冯凯，李铸国，张超. 镁合金表面 Ni-C 涂层的耐腐蚀与耐磨性能研究[J]. 表面技术，2017，46 (3)：28-33.
[44] 孙建旺. 镁合金金黄色导电氧化膜工艺 [J]. 科技创新与应用，2013 (30)：56.
[45] 陈茜. 智能手机壳体的色彩与材质研究[J]. 中国科技信息，2014 (22)：187.
[46] 刘晶，何业东，李晓刚. 小电流镀铜对阳极氧化 AZ31 镁合金耐蚀性的影响[J]. 北京科技大学学报，2008，30 (8)：898-902.
[47] 陈显明，罗承萍，江文. 镁合金微弧氧化着色膜研究[J]. 材料导报，2009，23(S1)：535-537.
[48] 曹彬彬. ZK60 镁合金微弧氧化着色工艺及膜层特性研究[D]. 镇江：江苏科技大学，2013.
[49] 杨晓伟，马爱斌，刘欢，等. 镁合金微弧氧化着色电解液的研究进展[J]. 材料保护，2016，49 (12)：58-63.
[50] 李超楠. 铜盐体系镁合金 MAO 黑色膜层制备及热控性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
[51] 雷安顺. AZ91D 镁合金微弧氧化彩色膜的制备及性能研究[D]. 杭州：浙江工业大学，2013.

消失模铸造专家刘立中“坐堂”
——《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”告读者

刘立中先生，通过自主研发出独具特色的消失模铸造设备，并成功生产出精美铸件，自成体系。获得 30 多项国家发明专利，成为国内最早一批投身消失模铸造的专家，著有《消失模铸造工艺学》一书(2019 年 5 月 20 日化工出版社出版)，系其亲身历经 30 多年现场实践经验的总结和理论的升华。被叶升平教授称作国内“消失模铸造第一人”。

《消失模铸造工艺学》提出的“消失模铸造流场、热场、负压场三场理论”、“消失模铸造浇注系统直浇道细，横浇道粗，内浇道短的设计原则”、“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”的新理论，均属首创。为验证和推广这些新理论，自 2000 年起，先后举办 14 届刘立中先生主讲的“消失模铸造专题讲座”，反响热烈。业界知名专家——魏兵教授对此书评价，认为“每一项技术和观点都是从实践中来，又应用到实践中去，反复验证，不断完善，属完全的创新成果”。国内多家铸造企业应用“三场理论”取得了明显提高铸件合格率、明显提高金属液利用率、明显提高员工劳动效率，进而提高铸造企业经济效益的成果。

“消失模铸造三场理论”、特别是“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”解决了困扰消失模铸造的泡沫模型导致的缺陷，打开了消失模铸造工艺通向铸钢件，特别是低碳钢和不锈钢铸件的大门，也打开了对消失模铸造的理解还处于混沌状态的企业通往成功之路的大门。毫不夸张地讲，挽救了多家处于倒闭边缘的消失模铸造厂。

2019 年 6 月，应《铸造技术》杂志邀请，与刘立中先生联手，《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”，从专家的角度，“坐堂”解难答疑，回应业界同仁有关消失模铸造理论与实践各方面的咨询。

此举，势必为推动中国铸造业发展、尤其是消失模铸造技术的进步做出独特之贡献。欢迎业界同仁参与。